

陈雪娇, 王宇蕴, 徐 智, 等. 不同磷石膏添加比例对稻壳与油枯堆肥过程的影响及基质化利用的评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 1001–1008.

CHEN Xue-jiao, WANG Yu-yun, XU Zhi, et al. Effect of phosphogypsum addition on the rice husk and oil cake composting process and evaluation of its physicochemical character as a substrate[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5): 1001–1008.

## 不同磷石膏添加比例对稻壳与油枯堆肥过程的影响及基质化利用的评价

陈雪娇, 王宇蕴, 徐 智\*, 赵乾旭

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

**摘要:**为探索稻壳和磷石膏两种固体废弃物资源化利用的新途径,以稻壳和油枯为发酵堆体原料,研究添加磷石膏对堆肥基质化发酵进程及腐熟后基质品质的影响。磷石膏添加量基于堆体有机物料(干重)的10%、20%、30%、40%和50%(分别记为A10、A20、A30、A40和A50),以磷石膏添加量为0作为对照(CK)。结果表明,磷石膏的添加促进了堆肥温度的快速升高,但其添加量超过有机物干物质的40%时会导致堆肥高温时间变短;以堆肥过程中水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{C/N}$ 、 $T_{\text{CN}}$ 值[(不同时期 $\text{C/N}$ )/(初始 $\text{C/N}$ )]和种子发芽指数(GI)作为堆肥腐熟的判断标准来综合判断堆肥腐熟进程,表明添加磷石膏可以促进堆肥发酵进程,其中A40处理的堆肥发酵效果最好。从基质化利用的角度来看,堆体腐熟结束时,A40处理的全磷和全钾含量均显著高于其他处理,堆体容重、持水孔隙度、通气孔隙度等指标均达到了理想性基质的要求。A40处理腐熟后的堆肥更适合作为作物栽培基质。

**关键词:**磷石膏;稻壳;油枯;堆肥;基质化利用

中图分类号:X712 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)05-1001-08 doi:10.11654/jaes.2017-1463

### Effect of phosphogypsum addition on the rice husk and oil cake composting process and evaluation of its physicochemical character as a substrate

CHEN Xue-jiao, WANG Yu-yun, XU Zhi\*, ZHAO Qian-xu

(College of Resource and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** In this study, rice husk and oil cake were used as main raw composting materials, and different proportions of phosphogypsum were added to study the effect on composting efficiency and compost quality as a substrate. The proportions added were 0, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% of the dry weight base. The six treatments were referred to as CK, A10, A20, A30, A40, and A50. The results showed that the addition of phosphogypsum was beneficial for rapid temperature increase and retaining this temperature for a long time. However, the thermophilic phase was shortened when the added dose of phosphogypsum was over 40%. The content of water-soluble  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , the  $\text{C/N}$  ratio, the  $T_{\text{CN}}$  value (the ratio of  $\text{C/N}$  in different periods from the beginning of composting process), and the germination index (GI) during the composting process were used to comprehensively evaluate the composting efficiency. The results indicated that the addition of phosphogypsum could promote the fermentation process during composting, especially for the A40 treatment. As substrates, the total phosphorus and total potassium contents were significantly higher in the A40 treatment than for the other treatments, and the bulk density, water-holding porosity, and ventilatory porosity of the composting mass met the requirements of an ideal substrate.

**Keywords:** phosphogypsum; rice husk; oil cake; composting; substrate utilization

收稿日期:2017-10-28 录用日期:2017-12-14

作者简介:陈雪娇(1990—),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事固体废弃物资源化处理研究。E-mail:chenxj0705@163.com

\*通信作者:徐 智 E-mail:xuzhi9910@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800607);国家自然科学基金项目(31760609);云南农业大学自然科学基金青年科研项目(A2006097)

Project supported: The Nation Key Research and Development Program of China (2016YFD0800607); The National Nature Science Foundation of China (31760609); The Nature Science Youth Research Foundation of Yunnan Agricultural University (A2006097)

当今社会,实现对固体有机废弃物高效利用受到各级政府高度的重视,如何高效、无害利用这部分养分资源,不仅关系到社会环境安全,同时关系到农业与循环经济可持续发展进程。稻壳作为稻谷加工主要的副产品之一,富含纤维素、木质素、二氧化硅等,且稻壳具有比重小、质量轻、疏松、孔隙度大等优良特点<sup>[1-2]</sup>。据报道,我国稻谷年产量近2亿t,稻壳占稻谷籽粒重的20%左右<sup>[3]</sup>,大多企业将稻壳自然堆放或采取燃烧的方式处理,既浪费宝贵的土地资源,又增加周边环境污染风险与火灾隐患<sup>[4]</sup>。磷石膏是湿法磷酸、磷肥生产中的工业副产品之一,后续实际利用率仅有15%左右,其余85%的磷石膏未经进一步处理,若随意堆放会对环境造成潜在的威胁<sup>[5]</sup>。因此,如何实现对稻壳和磷石膏两种固体废弃物资源可循环利用已成为环境研究领域热点之一。大量研究表明,稻壳作为堆肥原料不仅可以调节堆体C/N比例,还可以调节堆体基质的疏松度,有利于通风供氧,加快堆体腐熟的进程<sup>[6-7]</sup>。有研究表明,在堆肥过程中,添加适当比例的磷石膏可以改变堆体腐熟的进程及其理化性质,已有研究证实,在胶籽油枯-锯末-磷石膏联合堆肥过程中,添加10%的磷石膏,堆体结束时的pH值稳定在6.0~6.5之间<sup>[8]</sup>。磷石膏可以有效地调节堆体的pH值,使之更加符合基质的要求<sup>[9]</sup>。磷石膏颗粒细小、容重大,添加磷石膏可以提高城市垃圾堆肥腐熟后基质的质量和保水性能,进而提高草坪质量,还可以促进多年生黑麦草和高羊茅的生长<sup>[10]</sup>。国内外研究者已在稻壳堆肥基质化方面做了大量研究<sup>[7,11-12]</sup>,目前存在的问题是稻壳虽然具有开发为优良基质的特点,但稻壳堆肥发酵制成的基质孔隙度大、容重小、含氮量低,稻壳单独堆肥时存在一定的弊端<sup>[1]</sup>,因此,选择油枯作为高氮物料的辅料并添加磷石膏将大幅提高稻壳资源化利用率。一方面,磷石膏会起到增加容重和持水孔隙度的作用,另一方面,考虑到堆体基质化发酵过程存在碱化的发展趋势以及适当降低

堆体的pH值可以降低氮素损失,因此在稻壳和油枯堆体发酵过程中添加不同比例磷石膏从而实现对磷石膏的资源化利用。本研究以稻壳、油枯为主要的发酵堆体原料,期望通过不同磷石膏添加量对稻壳油枯基质化发酵过程中腐熟程度、营养成分变化及基质品质的影响,探索稻壳和磷石膏两种固体废弃物资源化利用的新途径,进一步为稻壳基质化大规模生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于2016年5月19日至2016年6月14日在云南农业大学实验教学基地的温室大棚内进行,周期为26d。供试物料为稻壳和油枯,购买于云南省昆明市晋宁科贸有限公司,磷石膏来源于云南省昆明市晋宁昆阳磷肥厂。磷石膏pH 4.5, CaO 282.35 g·kg<sup>-1</sup>, MgO 7.65 g·kg<sup>-1</sup>, Cd 0.68 mg·kg<sup>-1</sup>, Pb 42.53 mg·kg<sup>-1</sup>, Cr 36.13 mg·kg<sup>-1</sup>, As 16.56 mg·kg<sup>-1</sup>,具体原料基本理化性质见表1。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 好氧发酵装置

本试验采用好氧高温腐熟方法,好氧发酵装置为泡沫塑料材料(长54cm,宽27cm,高34cm)。每个发酵箱体四周先用保鲜膜覆盖,再用透明胶带缠绕数次,起到良好的保温效果。距离发酵箱体底部3cm处的右侧打一个小孔,空气气泵通过皮管从小孔进入箱体。

#### 1.2.2 试验处理

堆体物料混匀前,油枯需用植株粉碎机打成粉末状,磷石膏过2mm筛。以稻壳为碳源,油枯为氮源,按照C/N比为30配制和混合有机物料(稻壳和油枯),在保证每个堆肥处理的有机物料(稻壳和油枯)总量一致的前提下,按照有机物料干重的10%、20%、30%、40%和50%添加磷石膏(磷石膏的添加量以干

表1 供试材料基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of the experimental materials

原料 Materials	含水率 Moisture Content/%	全碳 Total C/ g·kg <sup>-1</sup>	全氮 Total N/ g·kg <sup>-1</sup>	C/N	全磷 Total P/ g·kg <sup>-1</sup>	全钾 Total K/ g·kg <sup>-1</sup>	电导率 EC/ mS·cm <sup>-1</sup>	容重 Bulk density/g·cm <sup>-3</sup>
稻壳 Rice husk	7.93	421.41	8.24	51.14	16.51	1.30	1.08	0.13
油枯 Oil cake	10.93	474.06	67.13	7.06	29.86	3.23	1.39	0.56
磷石膏 Phosphogypsum	18.89	—	—	—	19.76	0.15	5.86	1.12

注:“—”表示该原料的该指标未检测出。

Note: “—” indicates the index of the material was not detected.

重计,分别记作 A10、A20、A30、A40 和 A50 处理),以磷石膏添加量为 0 作为对照(CK),堆体的含水率设置为 55%,共 6 个处理(表 2),每个处理重复 3 次。发酵过程中每隔 1 h 通气 5 min。堆体腐熟前期每日翻堆 1 次,之后每隔 3 d 翻堆 1 次。

### 1.3 样品采集与测定

#### 1.3.1 样品采集

分别于发酵过程中第 0、3、6、12、18、22、26 d 采样。在翻堆充分混匀后,采用五点取样法,每个堆体每次采集约 300 g 混合样,平均分为两份,一份置于 4 ℃ 冰箱保存待用,另一份风干、磨碎过 1 mm 筛待测。

#### 1.3.2 测定指标及方法

发酵过程中,每日上午 9:00 用水银温度计测定堆体中心温度,并测定环境温度。水分含量采用 105 ℃ 烘箱干燥法测定;pH 和电导率(Electrical conductivity, EC)测定方法均参见文献[13];全碳(Total carbon, TC)、全氮(Total nitrogen, TN)、全磷(Total phosphorus, TP)、全钾(Total potassium, TK)含量测定参见文献[14]。

样品水溶性铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量测定:称取 2 g 新鲜堆体样品置于三角瓶中,加入 1 mol·L<sup>-1</sup> KCl 溶液 40 mL<sup>[6]</sup>,于恒温摇床中 180 r·min<sup>-1</sup> 下振荡 60 min 后过滤。滤液保存于 4 ℃ 冰箱中,1 周内用 AutoAnalyzer 3 High Resolution 连续流动分析仪(德国 SEAL 公司)测定浸提液中水溶性 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。

样品容重、孔隙度测定:将风干后的基质装入一定体积(V)的环刀(包括垫有滤纸的滤孔盖,质量为 m<sub>0</sub>)中,水中浸泡 24 h 后,称其质量(m<sub>1</sub>),放在干砂上,待水分自由沥干后称重(m<sub>2</sub>),放入 105~110 ℃ 烘箱内,烘干至恒重(m<sub>3</sub>)。根据文献[15-16],计算方法为:

$$W_b=(m_3-m_0)/V$$

$$W_t=(m_1-m_3)/V \times 100\%$$

$$W_v=(m_1-m_2)/V \times 100\%$$

$$W_w=W_t-W_v$$

$$W_a=W_v/W_w$$

式中, W<sub>b</sub> 为干密度, g·cm<sup>-3</sup>; W<sub>t</sub> 为总孔隙度; W<sub>v</sub> 为通气孔隙度; W<sub>w</sub> 为持水孔隙度; W<sub>a</sub> 为气水比。

种子发芽指数(Germination index, GI)测定:称取待测新鲜堆体样品 10 g,与 40 mL 蒸馏水混合,振荡 60 min 后过滤,吸取滤液 10 mL 加到垫有 1 张滤纸的干燥培养皿中,每个培养皿均匀放入 20 粒饱满的小白菜种子,置于恒温培养箱中,于 30 ℃ 下培养 48 h,测定根长和发芽率,同时以蒸馏水为对照,每个处理重复 3 次。根据文献[6]和[17]提供的方法来计算:

$$GI=(\text{堆体浸提液种子发芽率} \times \text{种子根长})/(\text{对照种子发芽率} \times \text{种子根长}) \times 100\%$$

C/N 和 T<sub>C/N</sub> 值作为判断堆体腐熟程度的指标<sup>[18-19]</sup>,其计算方法为:

$$C/N=TC/TN$$

$$T_{C/N}=(\text{不同时期 } C/N)/(\text{初始 } C/N)$$

#### 1.4 试验数据处理

采用 OriginPro 9.1 软件作图,运用 Microsoft Excel 2007 对试验数据进行统计与处理,采用 SPSS 19.0 软件对所有处理进行方差分析与 LSD 多重比较, P < 0.05 表示差异显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同磷石膏添加比例对稻壳和油枯堆肥过程的影响

#### 2.1.1 磷石膏添加量对堆肥发酵过程中温度变化的影响

堆体温度是衡量与评价堆体腐熟质量和腐熟程度的指标之一,能影响微生物活动能力,也能反映出有机物料转化进程。由图 1 可知,堆体发酵过程中各处理温度变化趋势一致,均经历了升温阶段、高温阶

表 2 物料发酵处理设计

Table 2 The treatment design of fermenting materials

处理 Treatments	物料组分 Material components	稻壳 Rice husk/kg	油枯 Oil cake/kg	磷石膏 Phosphogypsum/kg	C/N	含水率 Moisture Content/%
CK	稻壳+油枯	8.78	1.03	0.00	30	55
A10	稻壳+油枯+10%磷石膏	8.78	1.03	0.90	30	55
A20	稻壳+油枯+20%磷石膏	8.78	1.03	1.80	30	55
A30	稻壳+油枯+30%磷石膏	8.78	1.03	2.70	30	55
A40	稻壳+油枯+40%磷石膏	8.78	1.03	3.60	30	55
A50	稻壳+油枯+50%磷石膏	8.78	1.03	4.50	30	55

段和降温阶段。各处理比较来看,CK处理的堆体温度在第8 d升温至50℃以上,A40处理的堆体温度在第2 d已进入高温期(>55℃),A10、A20、A30、A50处理的堆体温度在第3 d才进入高温期,CK、A10、A20、A30、A40和A50处理高温( $\geq 50^\circ\text{C}$ )分解持续的时间分别为7、12、12、11、11 d和9 d。一方面,这可能由于添加磷石膏增加了堆体孔隙结构,为堆体积累了大量热量;另一方面,也可能由于添加磷石膏减少了堆体初期水分的蒸发,致使热量累积。说明添加磷石膏有利于堆肥升温 and 持续高温,但磷石膏添加量超过有机物干物质的40%可能会对堆肥保持持续高温的能力不利。

### 2.1.2 磷石膏添加量对堆肥发酵过程中水溶性铵态氮和硝态氮含量变化的影响

各堆体基质化腐熟过程中水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的变化情况从图2A可以看出来,堆体发酵前期,各堆体水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量迅速增加,在第6 d达到最大值后,趋于下降。这是因为在堆体升温期及高温期,微生物快速生长和繁殖加速有效N的分解,并以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的

形式快速累积<sup>[20]</sup>,而后随着发酵物料的腐熟,水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 一部分用于微生物的代谢和同化作用的消耗,一部分以 $\text{NH}_3$ 的形式损失掉<sup>[21]</sup>。本试验研究结果表明,在水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 上升阶段,磷石膏添加处理的水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 增加速率高于CK,其中A40处理增加速率最高,达26.63%。这可能与A40处理的堆体持续高温时间较长,有机N的矿化作用较强有关。在水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 下降阶段,A40处理的水溶性 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 减少速率最大,为67.84%,其次是A30处理,均显著高于A10、A20和A50处理。按照堆体发酵腐熟时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量低于 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[22]</sup>这一标准判断,除A10和A20处理外,其他处理堆体发酵结束时均已基本达到腐熟要求,其中以A40处理效果为最好。

堆体硝化细菌的活性易受到温度的控制,最适温度为30℃左右,温度超过40℃时活性受到抑制<sup>[22]</sup>。由图2B可知,堆体发酵前期,各处理堆体水溶性 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量均较低,在前12 d内,各处理堆体水溶性 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量虽有一定程度的增加,但增加速率缓慢,这是因为堆体发酵前期高温抑制了硝化细菌的生长

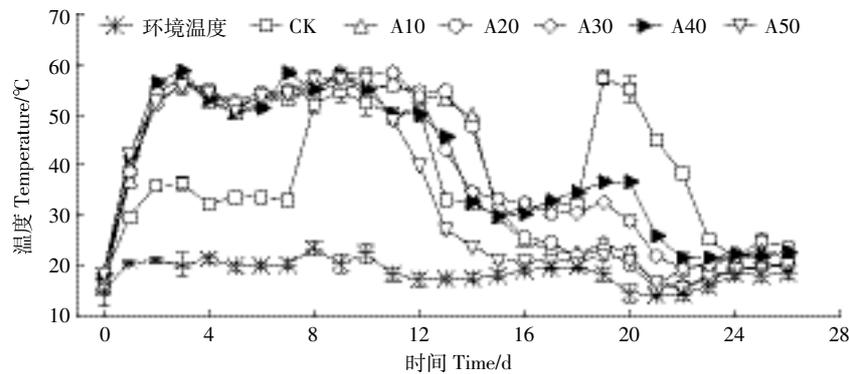


图1 不同处理对堆肥发酵过程中温度变化的影响

Figure 1 Effects of different treatments on temperature variations during the composting process

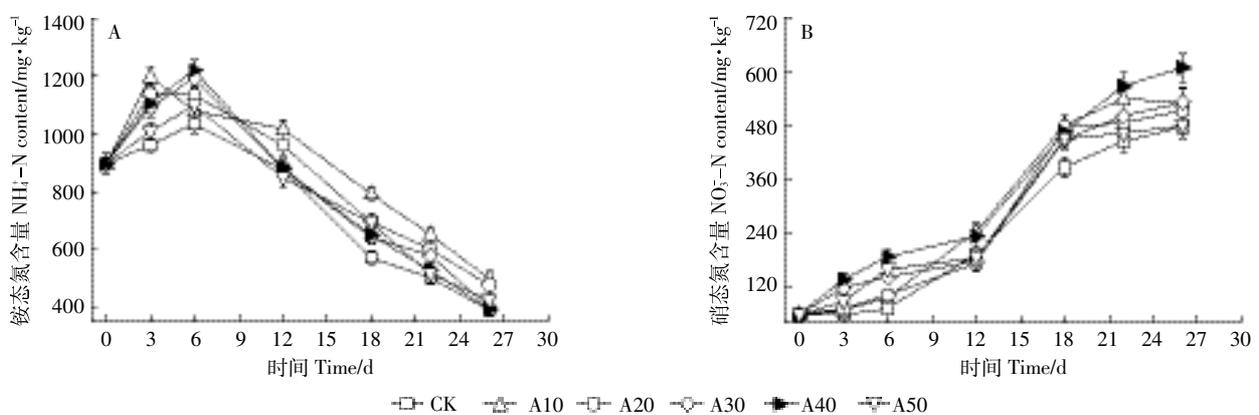


图2 不同处理对堆肥发酵过程中水溶性铵态氮(A)和硝态氮(B)含量变化的影响

Figure 2 Effects of different treatments on water soluble  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (A) and  $\text{NO}_3^+\text{-N}$ (B) contents variations during the composting process

活动。这与徐智等<sup>[23]</sup>对不同牛粪添加比例与西番莲果渣混合腐熟发酵的研究结果一致。堆体发酵 12 d 后,各处理堆体水溶性  $\text{NO}_3^-$ -N 含量迅速升高,除 A50 处理外,随着磷石膏添加量的增加,水溶性  $\text{NO}_3^-$ -N 增加的速率增大,说明添加磷石膏对水溶性  $\text{NO}_3^-$ -N 生成具有促进作用。

### 2.1.3 磷石膏添加量对堆肥发酵过程中碳氮比与 $T_{\text{CN}}$ 值变化的影响

C/N 是用于评价堆体腐熟度与稳定度的重要参数<sup>[22]</sup>。从图 3A 可以看出,除 A10 和 A20 处理的 C/N 呈现先上升后下降的趋势,其他处理堆体 C/N 的变化趋势相同,即呈逐渐下降的趋势。各处理分别从堆体初始 C/N 为 30 依次降至堆体发酵结束时的 21.37、14.78、14.06、13.16、12.54 和 13.22,分别下降了 28.77%、50.73%、53.13%、58.20% 和 55.93%,可以看出 A40 处理下的堆体 C/N 下降速率较快。有关研究<sup>[19,24]</sup>指出,当堆体发酵结束时 C/N 小于 20 被认为物料已腐熟,说明除 CK 处理外,其他处理堆体已达到腐熟标准。

$T_{\text{CN}}$  值小于 0.6 可以作为判断堆体物料完全腐熟的标准<sup>[25]</sup>。若以  $T_{\text{CN}}$  小于 0.6 作为判断标准,由图 3B

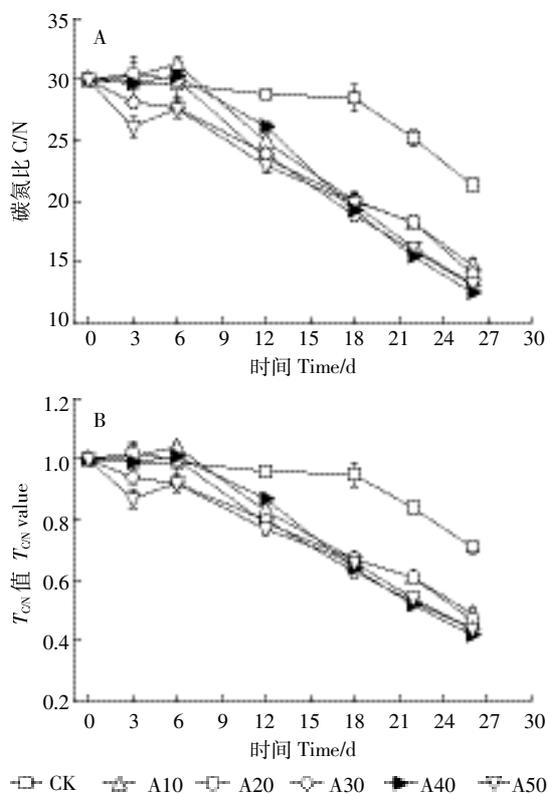


图 3 不同处理对堆肥发酵过程中碳氮比(A)和  $T_{\text{CN}}$  值(B)变化的影响

Figure 3 Effects of different treatments on carbon-nitrogen ratio (A) and  $T_{\text{CN}}$  value (B) variations during the composting process

可知,至堆体发酵结束时,各处理的  $T_{\text{CN}}$  值依次为 0.71、0.49、0.47、0.44、0.42、0.44。由此可知,除 CK 处理外,磷石膏添加处理的堆体已达到腐熟要求,其中以 A40 处理的腐熟效果较为理想。

### 2.1.4 磷石膏添加量对基质堆体种子发芽指数变化的影响

GI 是用来判断堆体物料腐熟效果与检测植物毒性的一种直接、快速指标。Wong 等<sup>[26]</sup>认为,当  $\text{GI} > 50\%$  时,说明堆体基本腐熟,无毒性;当  $\text{GI} > 80\%$ ,堆体完全腐熟,对植物没有毒性。如果以  $\text{GI} > 80\%$  对植物没有毒性为判断标准,CK 处理到堆肥结束时还达不到这个要求,A10、A20、A30、A40 和 A50 处理分别于堆肥第 22、22、18、12 d 和 12 d 达到这一要求(图 4)。说明磷石膏添加处理可以促进堆体 GI 的提高,到堆肥结束时,A40 处理的 GI 最高,为 91.83%。这些结果与李赟等<sup>[7]</sup>研究的辅料添加对厨余垃圾快速堆肥腐熟度的影响得到的结果相似。这可能因为添加辅料增加了堆体孔隙度,为好氧微生物提供了良好的水、气条件,从而促进堆体物料的腐熟脱毒。

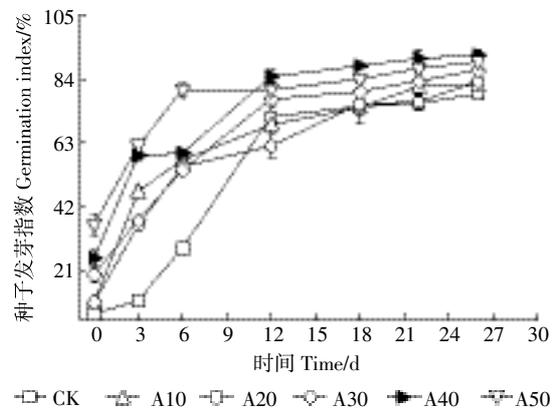


图 4 不同处理对堆肥发酵过程中种子发芽指数变化的影响  
Figure 4 Effects of different treatments on germination index during the composting process

### 2.2 基于基质化要求对堆肥腐熟后理化性质的评价

栽培基质通常包括 3 部分:固体、气体、液体。固体主要起到保护作物根系生长及固定植株的作用,液体用于供应作物水分和养分,气体可以保持根系同外界的  $\text{O}_2$  与  $\text{CO}_2$  的交换。固体质量的好坏以体积质量表示<sup>[19]</sup>。由表 3 可知,至堆体发酵结束时,磷石膏添加对基质堆体容重、通气孔隙度和持水孔隙度的影响具有显著性 ( $P < 0.05$ )。A10、A20、A30、A40 和 A50 处理下的容重均大于 CK 处理,分别提高了 4.35%、13.04%、21.74%、39.13% 和 56.52%。A40 和 A50 处理与 CK 相

表3 堆肥腐熟后不同处理的物理指标

Table 3 Physical properties of different treatments after composting

处理 Treatment	容重 Bulk density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	总孔隙度 General porosity/%	通气孔隙度 Ventilatory porosity/%	持水孔隙度 Water-holding porosity/%	气水比 Air water ratio
CK	0.23±0.02c	83.06±1.43x	49.21±2.39a	33.85±1.15bc	1.46±0.12y
A10	0.24±0.01c	80.67±2.49xy	52.05±3.96a	28.62±1.69c	1.85±0.24y
A20	0.26±0.01c	78.34±1.01xy	45.83±1.86ab	32.51±2.55bc	1.44±0.18y
A30	0.28±0.02bc	78.09±1.85xy	45.37±3.29ab	32.72±2.93bc	1.42±0.20y
A40	0.32±0.02ab	78.61±1.37xy	33.42±6.68b	45.19±5.36a	0.79±0.23x
A50	0.36±0.04a	75.69±0.51y	34.34±2.68b	41.35±2.19ab	0.84±0.11xy

注:同一列内不同小写字母表示在  $P<0.05$  水平上差异显著,若处理间没有显著交互作用则采用不同字母体系(xyz)。下同。

Note: Different small letters in the same column show significant differences at  $P<0.05$  level. Different letter systems(xyz) indicate in significant interaction between different treatments. The same as below.

比,持水孔隙度分别增加了 33.50%和22.16%。而磷石膏添加对总孔隙度和气水比的影响均不显著( $P>0.05$ )。焦永刚等<sup>[27]</sup>指出,理想基质的体积质量范围为  $0.1\sim 0.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,最佳体积质量为  $0.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ <sup>[16]</sup>,连兆煌等<sup>[28]</sup>认为是容重 $<0.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。依据农业标准,理想基质总孔隙度 $>60\%$ ,持水孔隙度 $>45\%$ ,通气孔隙度 $>15\%$ ,气水比(通气孔隙度/持水孔隙度)为 $0.25\sim 0.5$ <sup>[29]</sup>。按照以上衡量基质标准,各堆体发酵结束时,除气水比指标外,各处理的物理性质均达到理想基质的要求。但考虑到固定植株、促进植物根系生长、通气及保水能力等对基质的要求,认为 A40 处理腐熟的基质较适合作物栽培。

适合作物生长的栽培基质除了具备良好的物理性质外,还应具备合适的化学性质,如 pH 值、EC 值,营养元素种类及含量<sup>[30-31]</sup>。至堆体发酵结束时,磷石膏添加对基质堆体全 N、全 P、全 K、 $T_{\text{CN}}$  值、pH 值与电导率均具有显著影响( $P<0.05$ ,表 4)。处理间比较发现,A40 处理下的基质堆体全 N、全 P 及全 K 含量,具有最高值,与 CK 处理相比,分别提高了 12.28%、44.34%和 51.99%。一般认为,理想基质 pH 值为 6~8<sup>[32]</sup>。综上所述,按照此标准,考虑各个堆体基质养分

供应能力,以 A40 处理腐熟的基质更适合作物栽培。

### 3 结论

(1)从稻壳油枯堆肥的腐熟程度来看,A40 处理下,持续高温时间较长,加快了堆体腐熟进程;至堆体发酵结束时,有效控制了堆体发酵过程中  $\text{NH}_3$  的损失,促进了水溶性硝态氮的累积,且能最大可能地促进堆体的腐熟脱毒。因此以 40%磷石膏处理堆肥腐熟效果最好。

(2)从堆肥腐熟基质化利用来看,堆体腐熟结束后,40%磷石膏处理下的全磷和全钾含量均显著高于其他处理,增加了堆体容重和持水孔隙度,协调了通气孔隙度,达到了理想性基质的要求,说明 40%磷石膏处理腐熟后的基质更适合作物栽培。

#### 参考文献:

- [1] 尚秀华,谢耀坚,杨小红,等. 4 种不同氮源对稻壳腐熟处理效果的研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(12): 2226-2230.  
SHANG Xiu-hua, XIE Yao-jian, YANG Xiao-hong, et al. The effect of four different nitrogen sources on rice husk compost[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(12): 2226-2230.
- [2] 李 玥. 稻壳综合利用的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2004.

表4 堆肥腐熟后不同处理的化学指标

Table 4 Chemical properties of different treatments after composting

处理 Treatment	全氮 Total N/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) Total P/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾( $\text{K}_2\text{O}$ ) Total K/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$T_{\text{CN}}$	pH	电导率 EC/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$
CK	15.07±0.18d	17.57±0.53e	2.77±0.06d	0.71±0.02bc	8.45±0.02a	1.41±0.08b
A10	16.61±0.15b	18.61±0.56de	2.99±0.10cd	0.49±0.02c	8.23±0.02c	2.56±0.01ab
A20	17.29±0.16a	20.45±0.53cd	3.40±0.10bc	0.47±0.01bc	8.14±0.01b	3.51±1.21a
A30	15.83±0.14c	22.85±0.84b	3.71±0.22b	0.44±0.01bc	8.23±0.01b	3.64±0.02a
A40	16.92±0.20ab	25.36±0.76a	4.21±0.17a	0.42±0.01a	7.37±0.01d	3.76±0.01a
A50	15.44±0.20cd	21.80±0.23bc	3.05±0.09cd	0.44±0.01ab	8.13±0.01b	3.98±0.03a

- LI Yue. Study on the comprehensive utilization of rice hulls[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2004.
- [3] 王红彦,王道龙,李建政,等. 中国稻壳资源量估算及其开发利用[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(1):298-300.
- WANG Hong-yan, WANG Dao-long, LI Jian-zheng, et al. Developing and using of rice husk resources in China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(1):298-300.
- [4] Zheng J L. Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: Yields and related properties and improvement of the pyrolysis system[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007, 80(1):30-35.
- [5] Chen Q S, Zhang Q L, Fourie A, et al. Utilization of phosphogypsum and phosphate tailings for cemented paste backfill[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 201:19-27.
- [6] 谷思玉,蔡海森,闫立龙,等. 鸡粪与稻壳好氧堆肥的不同 C/N 研究[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(4):51-58.
- GU Si-yu, Cai Hai-sen, YAN Li-long, et al. Study on different C/N ratio of aerobic composting between chicken manure and rice husk [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(4):51-58.
- [7] 李赟,袁京,李国学,等. 辅料添加对厨余垃圾快速堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3):1031-1039.
- LI Yun, YUAN Jing, LI Guo-xue, et al. Use of additive to control odors and promote maturity of municipal kitchen waste during aerobic composting[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3):1031-1039.
- [8] 范茂攀,汤利,徐智,等. 橡胶籽油枯-锯末-磷石膏联合堆肥过程研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2013, 28(5):750-754.
- FAN Mao-pan, TANG Li, XU Zhi, et al. Study on co-composting process of rubber seed oil cake, sawdust and phosphogypsum[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2013, 28(5):750-754.
- [9] Yang F, Li G X, Shi H, et al. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting[J]. *Waste Management*, 2015, 36:70-76.
- [10] 罗希榕,覃成,刘方,等. 添加磷石膏城市垃圾堆肥对草坪草生长及草坪质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(5):109-112.
- LUO Xi-rong, QIN Cheng, LIU fang, et al. The effect of urban rubbish composting manure with different phosphogypsum proportion on grass growth and lawn quality[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 37(5):109-112.
- [11] Mustafa G, Ali M A, Smith D, et al. Guar, jantar, wheat straw, and rice hull composts as replacements for peat in muskmelon transplant production[J]. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2016, 5(4):323-332.
- [12] Meng X, Liu B, Xi C, et al. Effect of pig manure on the chemical composition and microbial diversity during co-composting with spent mushroom substrate and rice husks[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 251:22-30.
- [13] Sciubba L, Cavani L, Marzadori C, et al. Effect of biosolids from municipal sewage sludge composted with rice husk on soil functionality[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(5):597-608.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [15] 冯海萍,曲继松,杨冬艳,等. 接种微生物菌剂对枸杞枝条基质化发酵品质的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5):1457-1463.
- FENG Hai-ping, QU Ji-song, YANG Dong-yan, et al. Effects of inoculation microbial agent on fermentation quality of wolfberry branches for substrate production[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5):1457-1463.
- [16] 程斐,孙朝晖,赵玉国,等. 芦苇末有机栽培基质的基本理化性能分析[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(3):19-22.
- CHENG Fei, SUN Zhao-hui, ZHAO Yu-guo, et al. Analysis of physical and chemical properties of reed residue substrate[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2001, 24(3):19-22.
- [17] 黄红英,孙恩惠,武国峰,等. 麦秸秸秆花盆堆肥化研究及评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12):2386-2393.
- HUANG Hong-ying, SUN En-hui, WU Guo-feng, et al. Composting of wheat straw flowerpots and its evaluation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12):2386-2393.
- [18] 徐智,汤利. 尿素作为补充氮源对西番莲果渣高温堆肥进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7):1399-1402.
- XU Zhi, TANG Li. Effects of adding urea supplementary nitrogen on high-temperature composting process of passion fruit marc[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7):1399-1402.
- [19] 李光义,李勤奋,张晶元. 木薯茎秆基质化的堆肥工艺及评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):320-325.
- LI Guang-yi, LI Qin-fen, ZHANG Jing-yuan. Process and assessment of organic substrate production by cassava stalk compost[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1):320-325.
- [20] 赵梦竹,潘燕辉,马金珠,等. 餐厨垃圾和污泥联合好氧堆肥中的氮素转化及损失[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(3):301-312.
- ZHAO Meng-zhu, PAN Yan-hui, MA Jin-zhu, et al. Nitrogen transformation and loss during the co-composting of food waste and sludge[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 2016, 52(3):301-312.
- [21] 冯海萍,曲继松,杨志刚,等. 氮源类型与配比对柠条粉基质化发酵品质的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5):171-178.
- FENG Hai-ping, QU Ji-song, YANG Zhi-gang, et al. Effects of type and proportion of nitrogen on fermentation quality of caragana powder for substrate production[J]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5):171-178.
- [22] Bernal M P, Albuquerque J A, Moral R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22):5444-5453.
- [23] 徐智,汤利,毛昆明,等. 牛粪对西番莲果渣高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):507-511.
- XU Zhi, TANG Li, MAO Kun-ming, et al. Effect of cow manure on passion fruit marc high-temperature compost maturity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2):507-511.
- [24] Zahrim A Y, Leong P S, Ayisah S R, et al. Composting paper and grass clippings with anaerobically treated palm oil mill effluent[J]. *Interna-*

- tional Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 2016, 5(3):221-230.
- [25] Morel T L, Colin F, Germon J C, et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost[M]//Gasser J K R. Composting of agricultural and other wastes. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1985:56-72.
- [26] Wong J W C, Karthikeyan O P, Selvam A. Biological nutrient transformation during composting of pig manure and paper waste[J]. *Environmental Technology*, 2017, 38(6):754-761.
- [27] 焦永刚, 石琳琪, 董灵迪, 等. 蔬菜无土栽培基质初步筛选研究[J]. 河北农业科学, 2010, 14(9):26-28.  
JIAO Yong-gang, SHI Lin-qi, DONG Ling-di, et al. Study on the preliminary selection of vegetable soilless culture substrates[J]. *Journal of Hebei Agriculture Sciences*, 2010, 14(9):26-28.
- [28] 连兆煌, 李式军. 无土栽培原理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.  
LIAN Zhao-huang, LI Shi-jun. Principle and technology of soilless culture[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994.
- [29] 中华人民共和国农业部. NY/T 2118—2012 蔬菜育苗基质[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY/T 2118—2012 Plug seedling substrate of vegetables[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [30] 李天林, 沈兵, 李红霞. 无土栽培中基质增选料的参考因素与发展趋势[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 1999, 3(3):250-258.  
LI Tian-lin, SHEN Bing, LI Hong-xia. Reference factors for selecting substrate components and their future trends[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 1999, 3(3):250-258.
- [31] 王素静, 唐辉, 沈博, 等. 无土栽培基质现状及展望[J]. 云南化工, 2007, 34(6):54-59.  
WANG Su-jing, TANG Hui, SHEN Bo, et al. Present status and prospect of soilless culture substrates[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2007, 34(6):54-59.
- [32] Taylor M D, Kreis R, Rejtö L. Establishing growing substrate pH with compost and limestone and the impact on pH buffering capacity[J]. *Hort Science*, 2016, 51(9):1153-1158.